



## II-129 – TRATAMENTO DE ESGOTO DE UMA UNIDADE UNIVERSITÁRIA POR ZONA DE RAÍZES COM TRÊS SUBSTRATOS DIFERENTES

**Douglas Pereira da Silva Pitaluga<sup>(1)</sup>**

Tecnólogo em Construção Civil/Edificações pelo Instituto Federal de Goiás – IFG. Mestre em Engenharia do Meio Ambiente e Especialista em Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos e Líquidos pela Universidade Federal de Goiás – UFG. Professor de Construção Civil do Instituto Federal de Goiás – IFG

**Rogério de Araújo Almeida<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Agrônomo, Mestre e Doutor em Agronomia. Especialista em Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos e Líquidos. Professor da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos – EA e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente – PPGEMA, da Universidade Federal de Goiás – UFG.

**Ricardo Prado Abreu Reis<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás – UFG. Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da FEC – UNICAMP. Professor dos cursos de graduação em engenharia civil e engenharia ambiental da Universidade Federal de Goiás – UFG

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua 64 esq. com Rua 11, s/n, Expansão Parque Lago, Formosa - GO - Brasil, CEP: 73.813-16. Tel: (61) 8159-9598, e-mail: [douglas.pitaluga@gmail.com](mailto:douglas.pitaluga@gmail.com)

### RESUMO

O presente estudo objetivou avaliar a eficiência de três diferentes substratos no tratamento de esgoto sanitário e sua susceptibilidade à colmatação. Para a realização do estudo, foi implantado um sistema experimental de tratamento de esgotos na Escola de Engenharia Civil, localizada no Campus I da Universidade Federal de Goiás (UFG), na cidade de Goiânia-GO. A estação experimental constituiu-se de um tanque séptico e um filtro anaeróbio, seguidos por três unidades, independentes, de zona de raízes. O tanque séptico e o filtro anaeróbio de fluxo ascendente são pré-moldados, em fibra de vidro, com um volume útil de 8 m<sup>3</sup> cada. Os leitos de zona de raízes foram confeccionados em alvenaria. Nos leitos foram instalados três tambores plásticos que recebem o esgoto proveniente do filtro anaeróbio. Os tambores são independentes, cada um para sua respectiva zona de raízes. Dentro de cada tambor havia uma bomba submersa (ativada com temporizador, a cada 15 minutos, em intervalo de duas horas, de segunda-feira a sábado), regulada para aplicar 60 L h<sup>-1</sup> de esgoto. As unidades são idênticas nas suas medidas, sendo 1,0 m de largura, 3,0 de comprimento e 0,65 m de profundidade total, com um volume útil de 1,65 m<sup>3</sup> cada. As unidades de zona de raízes foram vegetadas com a espécie *Hedychium coronarium*, conhecida por Lírio do Brejo, e preenchidas com brita # 1 nos cinquenta centímetros iniciais e finais, para aplicação e drenagem de líquidos, respectivamente. Na parte intermediária de cada unidade utilizaram-se diferentes substratos, sendo eles: areia lavada, brita # 0 e brita # 1. Foram analisados os seguintes atributos: DBO, DQO, OD, coliformes termotolerantes, pH, óleos e graxas, fósforo total, nitrogênio total Kjedhal, nitrogênio amoniacal e teor de sólidos. O sistema de tratamento do tipo zona de raízes mostrou-se eficiente no tratamento de esgoto sanitário gerado na unidade universitária com os três substratos avaliados. Não houve diferença significativa entre as eficiências dos tratamentos na remoção dos atributos: DQO, nitrogênio total Kjeldahl, nitrogênio amoniacal e óleos e graxas. O substrato areia foi mais eficiente na remoção da DBO e do fósforo total; o tratamento com substrato brita # 0 foi mais eficiente na remoção de coliformes termotolerantes, sólidos totais e sólidos totais fixos; e o tratamento com substrato brita # 1 foi mais eficiente na remoção de sólidos suspensos. O leito preenchido com areia colmatou após dezoito meses do início de aplicação de esgoto no sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Alagados construídos, Colmatação, Leito de macrófitas, Fitorremediação.

### INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas de tratamento de esgoto com plantas tem se constituído em excelente alternativa aos sistemas convencionais. São sistemas eficientes, auto-sustentáveis e de baixo custo, denominados de zona de raízes, alagados construídos e leitos cultivados, dentre outros. Podem ser implantados nos locais em que o esgoto é gerado, são facilmente operados, economizam energia e são mais flexíveis e menos susceptíveis às

variações das taxas de aplicação de esgotos. Esses sistemas são constituídos por quatro principais elementos: as plantas, os substratos, os microrganismos e o esgoto. O substrato é um dos mais importantes elementos dos sistemas zona de raízes. Além de conferir uma parcela significativa na eficiência do tratamento de esgotos, também contribui no tempo de vida funcional do sistema.

Nas estações de tratamento de esgoto por zona de raízes implantadas no Estado de Goiás tem-se observado a colmatação precoce do substrato, ocasionado pelo preenchimento dos vazios entre os grãos por partículas oriundas dos esgotos e pelo crescimento das raízes e do biofilme. A ocorrência desse fenômeno reduz o fluxo hidráulico ao ponto de acarretar o transbordamento de esgoto no leito, inviabilizando o funcionamento da estação e obrigando à substituição do substrato.

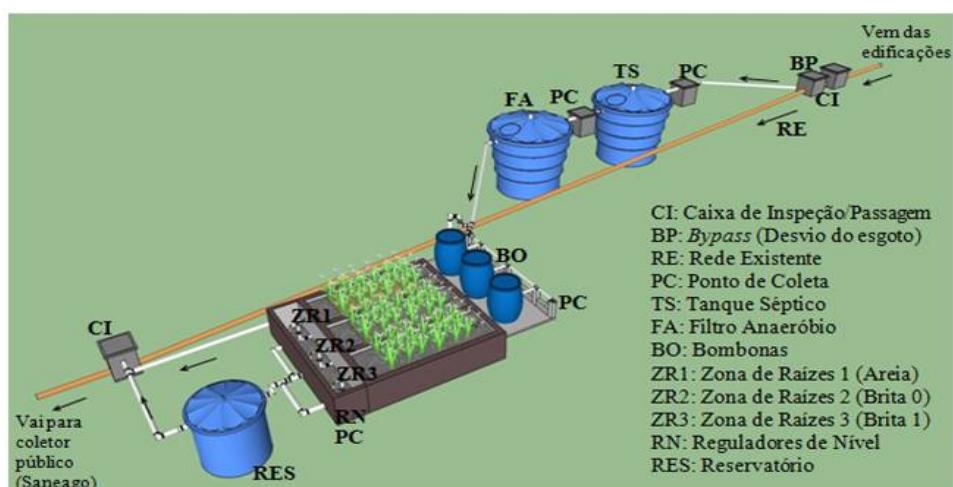
O presente estudo objetivou avaliar a eficiência de três diferentes substratos no tratamento de esgoto sanitário do tipo zona de raízes de fluxo subsuperficial horizontal e sua susceptibilidade à colmatação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do estudo, foi implantado um sistema experimental de tratamento de esgotos na Escola de Engenharia Civil, localizada no Campus I da Universidade Federal de Goiás (UFG), na cidade de Goiânia-GO. A unidade universitária conta com efetivos 1.721 alunos e 122 professores, dispersos entre os períodos matutino, vespertino e noturno. Somados com 51 funcionários técnico-administrativos, 7 vigias, 10 funcionários de limpeza e 7 funcionários da cantina, totalizam 1.918 pessoas.

A estação experimental constituiu-se de um tanque séptico e um filtro anaeróbio, seguidos por três unidades, independentes, de zona de raízes, e por um tanque reservatório para armazenamento do esgoto tratado (Figura 2). O tanque séptico e o filtro anaeróbio de fluxo ascendente são pré-moldadas, em fibra de vidro, de seção circular, com um volume útil de 8 m<sup>3</sup> cada. Os leitos de zona de raízes foram confeccionados em alvenaria.

Nos leitos foram instaladas três bombonas plásticas que recebem o esgoto proveniente do filtro anaeróbio por meio de um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro. As bombonas são independentes, sendo cada uma para sua respectiva zona de raízes. Com o objetivo de garantir a aplicação de uma lâmina exata e uniforme de esgoto nas zonas de raízes, instalou-se em cada bombona uma bomba submersa. Com o propósito de aplicar 180 L d<sup>-1</sup> em cada unidade, as bombas foram reguladas para a vazão de 60 L h<sup>-1</sup> e com apoio de um temporizador (timer) aplicou-se o esgoto durante 15 minutos correntes. O procedimento foi repetido a cada duas horas durante as 24 horas do dia, de segunda-feira a sábado, totalizando 12 aplicações de 15 L por dia, em cada leito de zona de raízes. As aplicações nas zonas de raízes eram interrompidas às 18h00min nos sábados e/ou vésperas de feriado, tendo em vista que a produção de esgoto na unidade universitária nos domingos e feriados é desprezível, e eram retomadas às 08h00min da segunda-feira ou do dia seguinte ao feriado.

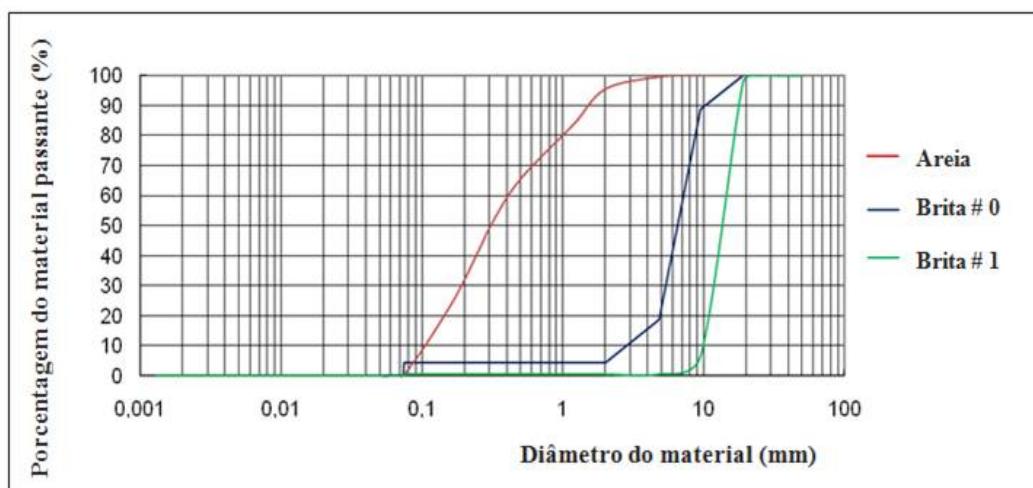


As unidades de zona de raízes, classificadas por Brix (1993) como um sistema de tratamento baseado em macrófitas emergentes de fluxo sub-superficial horizontal, foram construídas *in loco*, dimensionadas segundo orientações de Philippi e Sezerino (2004). São idênticas nas suas medidas, sendo 1,0 m de largura, 3,0 de comprimento e 0,65 m de profundidade total, com um volume útil de 1,65 m<sup>3</sup> cada. Para receber e distribuir uniformemente o esgoto foi colocado um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro em uma das extremidades do leito, perfurado em toda sua extensão e posicionado na parte superior do leito. A drenagem do esgoto deu-se pela extremidade oposta à entrada, em tubo de esgoto de PVC de 50 mm de diâmetro, igualmente perfurado, posicionado no fundo do leito.

As unidades de zona de raízes foram preenchidas com brita # 1 nos cinquenta centímetros iniciais e finais, para aplicação e drenagem de líquidos, respectivamente. Na parte intermediária de cada unidade utilizaram-se diferentes substratos, sendo areia lavada na zona de raízes 1 (ZR1), brita # 0 na zona de raízes 2 (ZR2) e brita # 1 na zona de raízes 3 (ZR3), ocupando 0,60 m de profundidade nos seus respectivos leitos (Figura 3). Por ocasião do preenchimento dos leitos utilizou-se de tábuas de madeira para separar a brita # 1 dos substratos nas zonas de raízes 1 e 2, retirando as tábuas em seguida. Os substratos foram caracterizados fisicamente conforme apresenta a Figura 4.



**Figura 3: Detalhe de preenchimento dos leitos com os substratos. Da esquerda para a direita: areia, brita # 0 e brita # 1.**



**Figura 4: Ensaio granulométrico dos substratos utilizados no preenchimento dos leitos das zonas de raízes da estação experimental de tratamento de esgoto da unidade universitária EE-UFG.**

Considerando a distribuição granulométrica dos substratos, o diâmetro dos grãos da areia lavada está entre 0,08 mm e 0,9 mm, da brita # 0 entre 0,08 mm e 20 mm e da brita # 1 entre 10 mm e 50 mm. Os substratos apresentaram um diâmetro efetivo (D10) de 0,11 mm, 3,0 mm e 10 mm para areia, brita # 0 e brita # 1, respectivamente. O coeficiente de uniformidade (D60/D10) dos substratos foi de 3,64 para areia, 2,33 para a brita # 0 e 1,05 para brita # 1. A medição de vazios dos substratos foi realizada pelo Método do Balão Volumétrico, resultando em 40% de espaços vazios para a areia e 50% para as britas.

As três unidades foram vegetadas com a espécie *Hedychium coronarium*, conhecida por Lírio do Brejo (Figura 5), escolhida pela elevada eficiência no tratamento de esgoto sanitário nas condições climáticas de Goiânia, além de proporcionar efeito paisagístico e aromático (ALMEIDA, 2005; ALMEIDA; OLIVEIRA; KLIEMANN, 2007).



**Figura 5: Vista das três unidades de zona de raízes da estação experimental de tratamento de esgoto da unidade universitária EE-UFG vegetadas com Lírio do Brejo (*Hedychium coronarium*).**

Amostras do esgoto antes e após passar pelas zonas de raízes foram coletadas e submetidas a análises laboratoriais para determinação de DBO, DQO, OD, coliformes termotolerantes, pH, óleos e graxas, fósforo total, nitrogênio total Kjedhal, nitrogênio amoniacal e teor de sólidos. A eficiência dos leitos na remoção dos atributos do esgoto foram calculadas utilizando a Equação 1, considerando a carga do poluente (concentração vezes vazão), conforme sugerido por Almeida e Ucker (2011):

$$Ef (\%) = \frac{(Ce \times Ve) - (Cs \times Vs)}{(Ce \times Ve)} \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

$Ef (\%)$  = eficiência percentual de remoção da carga poluidora de determinado atributo;

$Ce$  = concentração do atributo na entrada do leito;

$Ve$  = volume de esgoto na entrada do leito;

$Cs$  = concentração do atributo na saída do leito;

$Vs$  = volume de esgoto na saída do leito (calculado com base na evapotranspiração).

A colmatação dos leitos foi verificada visualmente, mediante a observação do empoçamento de esgoto na superfície dos leitos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta as concentrações dos atributos do esgoto após o filtro anaeróbio e após os leitos das zonas de raízes, as eficiências percentuais de remoção/elevação das cargas poluidoras (concentração vezes volume) de cada um dos tratamentos e suas concentrações médias. Também apresenta o resultado do teste de média (Tukey-Kramer) e o coeficiente de variação das eficiências para cada atributo.

**Tabela 1: Valores<sup>1</sup> médios de entrada do esgoto (EFA)<sup>2</sup>, valores médios de saída (EZR)<sup>3</sup>, média de eficiência percentual (EP)<sup>4</sup>, média geral de saída<sup>5</sup>, CV<sup>6</sup> e agrupamento<sup>7</sup>, verificados no tratamento de esgoto sanitário por zona de raízes, com diferentes substratos. Goiânia-GO. 2011.**

TRATAMENTO	DBO <sup>1</sup>			OD <sup>1</sup>			DQO <sup>1</sup>		
	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	EP <sup>4</sup>	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	EP <sup>4</sup>	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	EP <sup>4</sup>
ZR1: Areia		7	96,4 a		1,0	-		60	88,4 a
ZR2: Brita # 0		12	94,4 b		1,0	-		70	87,3 a
ZR3: Brita # 1	131	12	94,2 b	1,1	1,0	-	342	73	87,4 a
<b>MÉDIA<sup>5</sup></b>		<b>10,3</b>	<b>95,0</b>		<b>1,0</b>	<b>-</b>		<b>67,7</b>	<b>87,7</b>
<b>CV<sup>6</sup></b>		<b>1,7</b>			-				<b>3,0</b>
TRATAMENTO	CT <sup>1</sup>			pH <sup>1</sup>			OG <sup>1</sup>		
	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	Ef <sup>4</sup>	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	Ef <sup>4</sup>	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	Ef <sup>4</sup>
ZR1: Areia		$5,8 \times 10^3$	99,5952 a		7,1	-		0	100 a
ZR2: Brita # 0		$5,8 \times 10^3$	99,6257 a		7,2	-		0	100 a
ZR3: Brita # 1	$9,5 \times 10^5$	$1,8 \times 10^4$	98,8948 b	6,9	7,2	-	19	0	100 a
<b>MÉDIA<sup>5</sup></b>		$9,9 \times 10^3$	99,3719		7,2	-		0	100
<b>CV<sup>6</sup></b>		<b>0,7</b>			-				<b>0,0</b>
TRATAMENTO	FOSF. <sup>1</sup>			NTK <sup>1</sup>			N.AMON. <sup>1</sup>		
	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	Ef <sup>4</sup>	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	Ef <sup>4</sup>	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	Ef <sup>4</sup>
ZR1: Areia		0,5	93,9 a		46,3	56,2 a		33	58,2 a
ZR2: Brita # 0		3,5	62,4 b		49,0	57,9 a		36	58,3 a
ZR3: Brita # 1	5,8	3,7	61,0 b	70	47,1	59,2 a	52	35	59,5 a
<b>MÉDIA<sup>5</sup></b>		<b>2,6</b>	<b>72,4</b>		<b>47,5</b>	<b>57,8</b>		<b>34,7</b>	<b>58,7</b>
<b>CV<sup>6</sup></b>		<b>21,4</b>			<b>14,4</b>				<b>13,1</b>
TRATAMENTO	ST <sup>1</sup>			STF <sup>1</sup>			SS <sup>1</sup>		
	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	Ef <sup>4</sup>	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	Ef <sup>4</sup>	EFA <sup>2</sup>	EZR <sup>3</sup>	Ef <sup>4</sup>
ZR1: Areia		353	49,2 b		295	26,1 b		43,0	86,2 b
ZR2: Brita # 0		341	55,4 a		258	41,2 a		18,0	94,7 a
ZR3: Brita # 1	470	351	55,0 a	270	273	39,6 a	210	15,0	96,0 a
<b>MÉDIA<sup>5</sup></b>		<b>348</b>	<b>53,2</b>		<b>275</b>	<b>35,6</b>		<b>25,3</b>	<b>92,3</b>
<b>CV<sup>6</sup></b>		<b>12,2</b>			<b>28,3</b>				<b>8,1</b>

<sup>1</sup>Parâmetro: DBO: demanda bioquímica de oxigênio ( $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ ); OD: oxigênio dissolvido ( $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ ); DQO: demanda química de oxigênio ( $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ ); CT: coliformes termotolerantes (NMP 100mL $^{-1}$ ); pH: potencial hidrogeniônico; OG: óleos e graxas ( $\text{mg L}^{-1}$ ); FOSF.: fósforo total ( $\text{mg L}^{-1}$ ); NTK: nitrogênio total Kjeldahl ( $\text{mg L}^{-1}$ ); N. AMON.: nitrogênio amoniacal ( $\text{mg L}^{-1}$ ); ST: sólidos totais ( $\text{mg L}^{-1}$ ); STF: sólidos totais fixos ( $\text{mg L}^{-1}$ ); SS: sólidos suspensos ( $\text{mg L}^{-1}$ ); <sup>2</sup>EFA: efluente do filtro anaeróbio; <sup>3</sup>EZR: efluente da zona de raízes;

<sup>4</sup>Eficiência percentual (Ef) de remoção da carga do atributo, calculada pela equação  $Ef (\%) = 100 \times [(Ce \times Ve) - (Cs \times Vs)] / (Ce \times Ve)$ ; em que:  $Ce$  = concentração do atributo na entrada do leito;  $Ve$  = volume de esgoto na entrada do leito;  $Cs$  = concentração do atributo na saída do leito;  $Vs$  = volume de esgoto na saída do leito (calculado com base na evapotranspiração); <sup>5</sup>Média geral de saída; <sup>6</sup>CV: coeficiente de variação;

<sup>7</sup>Agrupamento: médias seguidas por mesma letra na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer, a 5% de probabilidade.

A maior média percentual na redução da DBO no efluente tratado foi de 96,4%, verificado na unidade preenchida com areia, que foi significativamente superior aos demais tratamentos, que não diferiram entre si. Na unidade com brita # 0 a redução da DBO foi de 94,4% e a unidade com brita # 1 de 94,2%.

O valor médio geral de saída para DBO do efluente tratado foi de  $7,0 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  no tratamento com areia e  $12 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  nos tratamentos com brita # 0 e com brita # 1 (Tabela 1). Estes valores atendem à Resolução Conama nº 357, que estabelece o valor máximo de  $120 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  podendo este valor ser ultrapassado desde que os sistemas de tratamento reduzam a carga poluidora em termos de DBO em no mínimo 60% para lançamentos de efluentes em corpos receptores de Classe 2 (CONAMA, 2011). Atende também o decreto estadual nº 1.745 de 1979, que no seu artigo 22 estabelece como padrão de lançamento para DBO o valor de  $60 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ , podendo este valor ser ultrapassado desde que os sistemas de tratamento reduzam a carga poluidora em termos de DBO em no mínimo 80% (GOIÁS, 1979).

Os tratamentos com os substratos brita foram menos eficientes que o tratamento com areia. O efeito de filtragem, propiciado pela areia pode ter influenciado na maior eficiência dos tratamentos com este substrato na redução da DBO. Em sistemas zona de raízes a DBO associada com sólidos é removida por meio da filtração e/ou sedimentação. Já a DBO solúvel/coloidal em solução é reduzida por meio da atividade dos microrganismos colonizados nos substratos ou nas raízes das plantas e suspensos na coluna d'água (STOWELL et al., 1981). Por possuir menos espaços vazios, a areia possibilita que a DBO solúvel/coloidal em solução permaneça mais próxima das colônias de microrganismos, promovendo maior eficiência que os demais substratos.

Não houve eficiência significativa dos tratamentos na remoção de Oxigênio Dissolvido. Na ocasião, a baixa eficiência de remoção do parâmetro OD é favorável. A queda de oxigênio dissolvido após passar por sistemas zona de raízes era esperada, uma vez que estes sistemas demandam quantidade de oxigênio dissolvido maior que a quantidade fornecida pelas plantas. Alguns estudos alertam que a quantidade de oxigênio transportado pelas plantas é insignificante no contexto do tratamento de esgotos (BRIX, 1990, 1994a), que por sua vez é consumido por compostos de carbono dissolvido (DBO), por compostos de nitrogênio dissolvido, por sedimentos orgânicos como resultado da decomposição de detritos, pela respiração de pequenos animais e pela própria planta (ápice da raiz), como resultado de uma alta demanda respiratória do tecido meristemático (NOGUEIRA, 2003). Assim, no processo de remoção de poluentes é consumido o oxigênio fornecido pelas plantas e ainda parte do oxigênio disponível no afluente.

A redução média percentual da DQO foi de 88,4% na ZR1, 87,3% na ZR2 e 87,4% na ZR3, com valores médios gerais de saída de  $60 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  na ZR1,  $70 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  na ZR2 e  $73 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  na ZR3 (Tabela 1). Assim como para OD, a Resolução Conama nº 357 (CONAMA, 2005) e o Decreto Goiano nº 1.745 (GOIÁS, 1979), que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, não fazem referência aos limites de DQO em efluentes.

Destaca-se que a DQO é reduzida principalmente por processos físicos (sedimentação e filtração) (SOLANO; SORIANO; CIRIA, 2004). Tal ação foi verificada por Sikora et al. (1995) ao observar que o tratamento testemunha (sem plantas) foi tão eficiente na redução da DQO quanto os tratamentos com plantas. Segundo Zanella (2008), a vegetação aumenta a eficiência na remoção de DQO em 3,2%, que estatisticamente não é significativa. No presente estudo foi observado que os três substratos utilizados obtiveram eficiências semelhantes, não diferindo significativamente entre si.

A relação DQO/DBO na saída foi da ordem de 8,6 na ZR1, 5,8 na ZR2 e 6,1 na ZR3. Relações altas indicam presença de frações não biodegradáveis elevadas. A relação DQO/DBO tende a aumentar à medida que o esgoto passa pelas unidades de tratamento, uma vez que fração biodegradável é reduzida após passar por estas unidades, ao contrário da fração inerte que permanece predominantemente inalterada. Assim, o efluente final do tratamento biológico apresenta valores da relação DQO/DBO usualmente superiores a 3,0 (ALMEIDA, 2005).

O valor médio geral de saída de coliformes termotolerantes foi de  $5,8 \times 10^3 \text{ NMP 100mL}^{-1}$  na ZR1 e ZR2 e  $1,8 \times 10^4 \text{ NMP 100mL}^{-1}$  na ZR3 (Tabela 1). A legislação brasileira não determina limite para os efluentes de ETE, porém, a Resolução Conama nº 357 (CONAMA, 2005) determina que a contribuição do efluente não pode elevar a contagem de coliformes termotolerantes nos corpos receptores acima de  $1.000 \text{ NMP 100mL}^{-1}$  e não deverá ser excedido um limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos seis amostras coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral, em corpos receptores de Classe 2. Entende-se assim, que o limite máximo de coliformes termotolerantes permitido ao efluente da ETE será determinado pela vazão do efluente, vazão do corpo receptor e a concentração de



coliformes já existentes no corpo receptor (ALMEIDA, 2005). Houve uma redução média percentual de coliformes termotolerantes de 99,5952% na ZR1, 99,6257% na ZR2 e 98,8948% na ZR3 (Tabela 1).

Provavelmente a baixa eficiência da ZR3, quando comparado aos demais tratamentos, estão relacionadas à granulometria do substrato. A ZR2 e a ZR1, preenchidas com substrato brita # 0 e areia, respectivamente, apresentaram maior eficiência, possivelmente, devido ao efeito de filtragem promovido por estes substratos, que por sua vez, obtiveram uma eficiência na remoção de coliformes termotolerantes significativamente maior que a ZR3.

Destacando também que os microrganismos patogênicos presentes nos esgotos são eliminados por meio de significativo decaimento natural, em função das condições desfavoráveis a que são expostos nos leitos construídos, exposição a raios ultravioleta, adsorção, filtração pelo meio suporte, sedimentação e morte por predação e competição com outros microrganismos. Entretanto vale salientar que a eficiência na remoção de bactérias em sistemas zona de raízes é decorrente, também, da população influente. Sendo que a eficiência é alta quando a população influente também é alta, mas apresenta eficiências negativas quando a população influente é inferior que as taxas de produção no local (MANSOR, 1998; VYMAZAL *et al.*, 1998; CUNHA, 2006).

O valor médio geral de saída do pH foi de 7,1 na ZR1 e 7,2 na ZR2 e ZR3 (Tabela 1), portanto dentro dos limites estabelecidos pela concessionária de saneamento de Goiás - Saneago para lançamento na rede coletora pública, que é de 6 a 10 e pela Resolução Conama nº 357 (CONAMA, 2005) e o Decreto Estadual nº 1.745 (GOIÁS, 1979), que determinam como condições de lançamento de efluentes o pH entre 5 e 9.

Destaca-se que o pH influencia a maioria das reações físico-químicas que ocorrem nos sistemas zona de raízes, como na dissociação das formas ionizadas e não ionizadas de ácidos e bases, além de controlar a solubilidade de muitos gases. Os íons hidrogênio também fazem parte do conteúdo total de cátions das áreas alagadas e são ativos nos processos de trocas catiônicas com os sedimentos e solos destas áreas (KADLEC; KNIGHT, 1996). O pH ótimo para o crescimento bacteriano é entre 6,5 e 7,5, sendo essa faixa preferencial para bactérias desnitrificantes, enquanto que as bactérias nitrificantes preferem pH igual ou maior que 7,2 (METCALF; EDDY, 2003).

A redução média percentual de óleos e graxas dos efluentes foi de 100% para as três unidades estudadas (Tabela 1), resultando em efluentes com teores virtualmente ausentes. Tal eficiência se manteve constante durante todo o período do experimento. A legislação permite que os efluentes contenham até 20 mg L<sup>-1</sup> de óleos minerais e até 50 mg L<sup>-1</sup> de óleos vegetais e gorduras animais (CONAMA, 2005). A mesma eficiência foi constatada por Almeida (2005, 2007), num sistema vegetado com Lírio do Brejo, preenchido com substrato areia e TDH de 4,09 dias, em Goiânia, GO e por Paulo *et al.* (2007) num sistema de fluxo sub-superficial vegetado com Papirus Anão e preenchido com areia lavada.

A redução média percentual de fósforo total foi de 93,9% na ZR1, 62,4% na ZR2 e 61,0% na ZR3, considerando a evapotranspiração do sistema. O valor médio do fósforo total no efluente foi de 0,5 mg L<sup>-1</sup> na ZR1, 3,5 mg L<sup>-1</sup> na ZR2 e 3,7 mg L<sup>-1</sup> na ZR3 (Tabela 1). A Resolução Conama nº 357 (CONAMA, 2005) e o Decreto Goiano nº 1.745 (GOIÁS, 1979), que dispõe as condições e padrões de lançamento de efluentes não fazem referência aos limites de fósforo total nos efluentes.

Houve diferença significativa entre ZR1 e os demais tratamentos na redução do fósforo total, onde a areia proporcionou maior eficiência na remoção de fósforo por possuir poder de adsorção do poluente maior que a brita # 0 e a brita # 1. De acordo com Zanella (2008), as britas possuem maior poder de remoção de fósforo por meio da sedimentação e precipitação, pois esse substrato tem baixa capacidade de adsorção e maior mecanismo fica com a absorção pela vegetação. De acordo com Meira *et al.* (2001), maiores percentagens de remoção deste atributo podem ser alcançadas utilizando o substrato solo, pois os componentes argilosos deste, assim como os óxidos de ferro e de alumínio, os componentes de cálcio e o pH favorecem a adsorção do fósforo.

Segundo Souza *et al.* (2004), a remoção de fósforo em sistemas zonas de raízes ocorre pela precipitação química, pela adsorção, pela assimilação dos vegetais e biofilmes formados no substrato e no sistema radicular

da vegetação. O fósforo solúvel é facilmente absorvido pelos sistemas radiculares das plantas aquáticas. Já a fração pouco solúvel associa-se ao ferro, ao alumínio e ao cálcio, tornando-se pouco assimilável pela planta, bem como pelos microrganismos.

Para o atributo nitrogênio total Kjeldahl, as unidades ZR1, ZR2 e ZR3, alcançaram a eficiência média percentual de 56,2%, 57,9% e 59,2%, respectivamente. O valor médio geral de saída foi de  $46,3 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $49 \text{ mg L}^{-1}$  e  $47,1 \text{ mg L}^{-1}$  para ZR1, ZR2 e ZR3, respectivamente (Tabela 1). A Resolução Conama nº 357 (CONAMA, 2005) e o Decreto Goiano nº 1.745 (GOIÁS, 1979), que dispõe as condições e padrões de lançamento de efluentes não fazem referência aos limites de nitrogênio total Kjeldahl.

O valor médio do nitrogênio amoniacal foi de  $33 \text{ mg L}^{-1}$  na ZR1,  $36 \text{ mg L}^{-1}$  na ZR2 e  $35 \text{ mg L}^{-1}$  na ZR3, resultando uma redução média percentual do nitrogênio amoniacal de 58,2% na ZR1, 58,3% na ZR2 e 59,5% na ZR3 (Tabela 1). Os valores estão acima dos limites estabelecidos pela Resolução Conama nº 357, que é de  $20 \text{ mg L}^{-1}$  (CONAMA, 2005), porém, a Resolução Conama nº 397 determina que o parâmetro nitrogênio amoniacal não mais será aplicável para efluentes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários (CONAMA, 2008).

De acordo com Kadlec e Knight (1996), diferentes são os processos de remoção do nitrogênio amoniacal da fração líquida nos sistemas zona de raízes, destacando-se a incorporação na biomassa vegetal, a adsorção ao material filtrante e, com mais ênfase, a nitrificação seguida da desnitrificação.

Meira *et al.* (2001), obtiveram uma redução de 67,3% e 77,9% com um TDH de 5 e 10 dias, respectivamente, utilizando brita # 0 num sistema de fluxo sub-superficial vegetado com taboa (*Typha* spp) nas condições climáticas de Campina Grande, PB. Segundo os autores, o nitrogênio amoniacal pode ter sido removido por volatilização ou consumo (absorção radicular), provavelmente ocorreu o segundo processo, visto que o pH em torno de 7 não estimulou a formação de  $\text{NH}_3$  e sim  $\text{NH}_4^+$ . Possível ação pode ter ocorrido no presente estudo, uma vez que o pH esteve próximo da neutralidade. Segundo Nogueira (2003), Almeida (2005) e Sezerino (2006) a volatilização da amônia é desprezível quando os valores do pH do meio estiverem abaixo de 7,5.

O valor médio dos sólidos totais foi de  $353 \text{ mg L}^{-1}$  na ZR1,  $341 \text{ mg L}^{-1}$  na ZR2 e  $351 \text{ mg L}^{-1}$  na ZR3, ocasionando uma redução média percentual de 49,2% na ZR1, 55,4% na ZR2 e 55% na ZR3 (Tabela 1). A Resolução Conama nº 357 (CONAMA, 2005) e o Decreto Goiano nº 1.745 (GOIÁS, 1979), que dispõe as condições e padrões de lançamento de efluentes não preconizam padrões de sólidos totais em efluentes.

Já os sólidos totais fixos apresentaram redução média percentual de 26,1%, 41,2% e 39,6% para ZR1, ZR2 e ZR3, respectivamente, com valores médios de  $295 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $258 \text{ mg L}^{-1}$  e  $273 \text{ mg L}^{-1}$  para ZR1, ZR2 e ZR3 (Tabela 1).

Por sua vez, os sólidos suspensos apresentaram valores médios de  $43,0 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $18,0 \text{ mg L}^{-1}$  e  $15,0 \text{ mg L}^{-1}$  para ZR1, ZR2 e ZR3, respectivamente, com eficiência média percentual de 86,2%, 94,7% e 96,0% (Tabela 1). A Resolução Conama nº 357 (CONAMA, 2005) e o Decreto Goiano nº 1.745 (GOIÁS, 1979), que dispõe as condições e padrões de lançamento de efluentes não fazem referência aos limites de sólidos suspensos.

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

O sistema de tratamento do tipo zona de raízes de fluxo sub-superficial horizontal, precedido de tanque séptico e filtro anaeróbio mostrou-se eficiente no tratamento de esgoto sanitário gerado na unidade universitária da EE-UFG com os três substratos de diferentes granulometrias.

Não houve diferença significativa entre as eficiências dos tratamentos na remoção dos atributos: DQO, nitrogênio total Kjeldahl, nitrogênio amoniacal e óleos e graxas. O tratamento ZR1 (substrato areia) foi mais eficiente na remoção da DBO e fósforo total; o tratamento ZR2 (substrato brita # 0) foi mais eficiente na remoção de coliformes termotolerantes, sólidos totais e sólidos totais fixos; e o tratamento ZR3 (substrato brita # 1) foi mais eficiente na remoção de sólidos suspensos.

A eficiência do sistema e as concentrações dos atributos no efluente final atendem às Resoluções do Conama (CONAMA, 2005, 2008, 2011) e ao Decreto Goiano nº 1.745 de 1979 (GOIÁS, 1979) para lançamento de efluentes de estação de tratamento de esgotos em corpos receptores de Classe 2.

O leito preenchido com areia (ZR1) colmatou após dezoito meses do início de aplicação de esgoto no sistema. Os leitos preenchidos com brita # 0 (ZR2) e brita # 1 (ZR3) não colmataram durante o período do experimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, R. A. **Substratos e plantas no tratamento de esgoto por zona de raízes**. Goiânia, GO: Universidade Federal de Goiás, 2005. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Federal de Goiás - UFG, 2005. 108 p.
2. ALMEIDA, R. A.; UCKER, F. E. Considerando a Evapotranspiração no Cálculo de Eficiência de Estações de Tratamento de Esgoto com Plantas. **Revista Engenharia Ambiental** - UNIPINHAL, v. 8, n. 4, p. 39-45. 2011.
3. BRIX, H. Gas exchange through the soil-atmosphere interphase and through dead culms of *phragmites australis* in a constructed reed bed receiving domestic sewage. **Water Science and Technology**, v. 24, n. 02, p. 259-266, 1990.
4. BRIX, H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. **Water Science and Technology**, n. 4, v. 29, p. 71-78, 1994a.
5. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, ano 142, n. 53, Seção 1, p. 58-63, 18 mar. 2005.
6. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil). Resolução nº 430, de 13 de março de 2011. Dispõe sobre Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 92, Seção 1, p. 89, 16 maio 2011.
7. CUNHA, C. A. G. **Análise da eficiência de um sistema combinado de alagados construídos na melhoria da qualidade das águas**. São Carlos, SP: 2006. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo – USP, 2006. 157 p.
8. GOIÁS. Decreto nº 1.745, de 06 de dezembro de 1979. Aprova o regulamento da lei nº 8.544, de 17 de outubro de 1978, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Goiânia, GO, 06 dez, 1979. Disponível em: <<http://www.agenciaambiental.go.gov.br/legislação>>. Acesso em: 11 fev. 2011.
9. KADLEC, R. H.; KNIGHT, R. L. **Treatment Wetlands**. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1996. 893 p.
10. MANSOR, M. T. C. **Uso de leito de macrófitas no tratamento de águas residuárias**. Campinas, SP: 1998. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, 1998. 106 p.
11. MEIRA, C.; CEBALLOS, B. S. O.; SOUZA, J. T.; KONIG, A. Wetlands vegetados no polimento de águas superficiais poluídas: primeiros resultados. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2001, João Pessoa. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, p. 1-6, 2001.
12. METCALF; EDDY. **Tratamiento y depuración de las aguas residuales**. Ed. Labor, Barcelona, 1981.
13. NOGUEIRA, S. F. **Balanço de nutrientes e avaliação de parâmetros biogeoquímicos em áreas alagadas construídas para o tratamento de esgoto**. Piracicaba, SP: CENA/USP, 2003. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo - USP, 2003. 137 p.
14. PAULO, P. L.; BRAGA, A. F. M.; MAXIMOVITCH, A. C.; BONCZ, M. Á. Tratamento de água cinza em uma unidade residencial de banhados construídos. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABES, 2007.
15. SEZERINO, P. H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical**. Florianópolis, SC: 2006.

Originalmente apresentada como tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 171 p.

16. SIKORA, F. J. *et al.* Ammonium removal in constructed wetlands with recirculating subsurface flow: removal rates and mechanisms. **Water Science and Technology**, Oxford, v. 32, n. 3, p. 193-202, 1995.
17. SOLANO, M. L.; SORIANO, P.; CIRIA, M. P. Constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment in small villages. **Biosystems Engineering**, London, v. 87, n. 1, p. 109-118, 2004.
18. SOUZA, J. T., VAN HAANDEL, A., LIMA, E. P .C.; HENRIQUE, I. N. Utilização de wetland construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reator uasb. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 285-290, out-dez, 2004.
19. STOWELL, R.; TCHOBANOGLOUS, G.; COLT, J.; KNIGHT, A. Concepts in aquatic system design. **Journal of the Environmental Engineering Division**, ASCE, 107, P 919-940, 1981.
20. VYMAZAL, J. Types of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. **Proceedings: 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**, CEA/UNESP e IAWQ, Águas de São Pedro/SP, 27 set. a 02 de out, V. 1, p. 150-166, 1998.
21. ZANELLA, L. **Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários**: Wetlands construído utilizando brita e bambu como suporte. Campinas, SP: 2008. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2008. 189 p.